مقایسهٔ تأثیر انواع آهک بر فشار و زمان تورم خاک بنتونیت*

عادل کاظم‌پور(۱) محمد سیروس پاکباز(۲) ایرج رسولان(۳)

چکیده امروزه باتوجه به وسعت خاک‌های تورمی و همچنین خرابی‌های ناشی از فشارهای حاصل از تورم این خاک‌ها، موجبات انهدام کامل ساختمان‌های سبک، پوشش کانال‌های آبیاری، کف‌سازی‌ها و ترک در پی‌ها را به‌وجود آورده است. در این تحقیق بااستفاده از آزمایش فشار تورم با حجم ثابت تغییرات فشار تورم و زمان فشار تورم نمونه‌های متراکم‌شده از مخلوط خاک بنتونیت با ۳٪ آهک هیدراتهٔ صنعتی، آهک زندهٔ صنعتی، آهک هیدراتهٔ سنتی و آهک زندهٔ سنتی در رطوبت ۲٪ الی۳٪ کمتر از رطوبت بهینه در زمان‌های عمل‌آوری ۰، ۱، ۷، ۲۸ و۹۰روزه اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری فشار تورم، باربرداری از نمونه‌ها به دو روش کنترل کرنش و کنترل تنش صورت گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که تأثیر افزودن آهک زنده به بنتونیت در کاهش مقادیر فشار تورم اولیه، زمان انتهای فشار تورم اولیه، سرعت فشار تورم ثانویه با زمان، شاخص تورم کنترل کرنش و کنترل تنش بیشتر از آهک هیدراته بود. به‌علاوه با افزایش درصد هیدروکسید کلسیم در آهک هیدراته و اکسیدکلسیم در آهک زنده شاخص‌های تورمی ذکرشده در بالا، در نمونه‌ها کاهش یافتند. نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زندهٔ سنتی دارای کمترین مقدار شیب فشار تورم ثانویه با زمان بود. شیب فشار تورم ثانویه با زمان نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زندهٔ صنعتی کمتر ازآن برای نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراتهٔ صنعتی بود. شاخص تورم باربرداری با کنترل کرنش از شاخص تورم باربرداری با کنترل تنش برای کلیهٔ نمونه‌ها بزرگ‌تر بود. ضمنا با افزایش زمان عمل‌آوری میزان فشار تورم اولیه، زمان انتهای فشار تورم اولیه، سرعت فشار تورم ثانویه با زمان و شاخص تورم کنترل کرنش و کنترل تنش همگی نمونه‌ها کاهش یافتند. شیب فشار تورم ثانویه با زمان برای انواع آهکها در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه با هم اختلاف چندانی نداشتند. زمان فشار تورم اولیه پس از ۹۰ روز عمل‌آوری برای آهک هیدراتهٔ سنتی کمترین و برای آهک هیدراتهٔ صنعتی بیشترین مقدار بود. پس از ۹۰ روز عمل‌آوری شاخص تورم کنترل کرنش و کنترل تنش برای آهک زندهٔ سنتی کمترین و برای آهک هیدراتهٔ صنعتی بیشترین مقدار بود.

واژه‌های کلیدی فشار تورم، تورم با حجم ثابت، آهک زنده، آهک هیدراته، تثبیت خاک، بنتونیت، شاخص تورم، کنترل تنش، کنترل کرنش، تورم ثانویه.

Comparing the Influence of Kinds of Lime on Time and Swelling Pressure of Bentonite

M. Siroos Pakbaz A. Kazempour I. rasoolan

Abstract *This research compares the influence of different kinds of lime on the amount and time of swelling pressure of bentonite. In the present research, constant volume method was used for measurement of samples of bentonite soil mixed with 3 % of quick and hydrated lime compacted at 2 – 3 % dry of optimum water content and after curing period of 0,1,7,28 and 90 days. The results showed that adding quick lime to bentonite decreased the magnitude of swelling pressure, the time to reach to primary swelling pressure, time rate of secondary swelling pressure and both stress and strain controlled swelling indices more effectively than the use of hydrated lime. It was also determined that the values of these parameters decreased further with increase in curing period. Traditional quick lime had the least slope of secondary swelling pressure with time. The slope of secondary swelling pressure with time for samples stabilized with industrial quick lime were lower than those which were stabilized with industrial hydrated lime.*

Key Words Swelling Pressure, Swelling with Constant Volume, Quick Lime, Hydrated Lime, Soil Stabilization Bentonite, Swelling Index, Stress Controlled Strain Controlled, Secondary Swelling.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۲۲ می‌باشد.

(۱)دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکدهٔ مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز. Email: Pakbaz_m@scu.ac.ir

(۳) استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

مقدمه

خاک‌های متورم‌شونده خاک‌هایی هستند که در اثر افزایش رطوبت افزایش حجم می‌دهند [1]. این تورم در اثر بارندگی، عبور آب از کانال‌ها، بالا آمدن سطح سفره زیرزمینی و جذب این آب به‌وسیلهٔ خاک و یا در اثر آبیاری زمین‌های کشاورزی ایجاد می‌گردد. فشار ناشی از تورم خاک‌ها می‌تواند آسیب کامل به سازه وارد نماید. در کشور آمریکا خسارت سالانهٔ ناشی از رفتار مخرب خاک‌های متورم‌شونده در بزرگراه‌ها، معابر، فرودگاه‌ها، پوشش تونل‌ها، کانال‌های آبیاری و دیگر سازه‌ها، به‌میزان ۹۰۰۰ میلیون دلار برآورد شده است که به‌تنهایی بزرگ‌تر از خسارات ناشی از بلایای طبیعی از قبیل سیل، طوفان و زلزله بوده است. عموما بالغ بر ٦٠ درصد از این سازه‌ها متحمل خسارات جزئی از قبیل ترک و حدود ۱۰ درصد از این سازه‌ها به شدت آسیب می‌بینند که دیگر قابل تعمیر نیستند [2]. خاک‌های متورم‌شونده از حیث نیروهای تورمی مختلفی که به کف‌های بتنی صلب و پی سازه‌های موجود می‌تواند وارد کنند، در برخی موارد سبب شکستگی و جابه‌جایی‌های غیرمجاز در سازه می‌گردد [3]. تورم معمولا در خاک‌هایی مشاهده می‌شود که به‌اندازهٔ لازم دارای ذرات ریزدانهٔ رسی باشند. خاک‌های مونت‌موریلونیت‌دار که اکثرا با نام تجاری بنتونیت شناخته می‌شوند، تمایل زیادی به جذب آب و متورم شدن دارند. پیوند صفحات این رس‌ها بسیار پایین است و آب به‌راحتی در بین صفحات آنها نفوذ می‌کند و در اثر جذب آب زیاد خاصیت تورمی این رس‌ها بسیار بالا می‌باشد[4]. دوناسن به‌دنبال جستجویی که حوالی سال ۱۹۷۰ برروی پراکندگی این خاک‌ها در جهان انجام داد، طی مقاله‌ای اعلام کرد که این خاک‌ها در ۱۸ کشور ازجمله در ایران گزارش شده است [2]. یکی از مؤثرترین روش‌های بهبود کیفی مشخصات تورمی خاک‌های رسی، که استفاده از آن متداول است، بهره‌گیری از آهک می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه از دیرباز تاکنون انجام گرفته و در حال انجام است [1]. آهک علاوه‌بر ناخالصی‌ها عمدتا شامل اکسید کلسیم (CaO) یا آهک زنده و هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) یا آهک هیدراته می‌باشد [4]. آهک به‌عنوان یک مادهٔ افزودنی بی‌نظیر در اصلاح و تثبیت خاک‌ها در زیر جاده‌ها و پروژه‌های سازه‌ای مشابه به‌کار می‌رود. زمانی که حداقل ۳ درصد آهک با خاک رس ترکیب می‌شود در حضور آب pH خاک تا ١٢/٤ افزایش می‌یابد و باعث جدا شدن سیلیکا (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) از داخل خاک به داخل محلول آب خاک می‌شود. این ترکیبات سپس با یون کلسیم ناشی از حضور آهک درون آب موجود در محیط ترکیب می‌شود و ایجاد سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) و آلومینات کلسیم هیدراته (CAH) می‌کند که پس از تشکیل سفت می‌شود و موجب چسبیده شدن ذرات رس به یکدیگر می‌شود [5]. مقاومت خاک‌های تثبیت‌شده با آهک عمدتا به‌مقدار اکسیدهای سیلیکا و آلومینا و کلسیم موجود در محیط بستگی دارد [6]. هرچه مقادیر آنها در محلول آب خاک بیشتر باشد مقاومت خاک تثبیت‌شده با آهک بیشتر و یا میزان تورم آن کمتر خواهد بود. مقادیر آهک ۳ تا ۸ درصد خاک خشک مناسب برای پایدارسازی خاک‌های تورم‌زا می‌باشد [5]. هرچند تعیین مقدار حداقل آهک لازم برای شروع واکنش‌های پوزولانی در خاک بستگی به کیفیت آهک، دما و حجم آب موجود دارد [7]. به این پروسه، پایدارسازی خاک گفته می‌شود [7]. در مقادیر آهک کمتر از ۳ تا ۵ درصد تجمع ذرات خاک رس توسط یون کلسیم بدون واکنش پوزولانی اتفاق می‌افتد [8, 7 ,4]. به این پروسه، اصلاح خاک اتلاق میگردد [7]. براساس تحقیق انجام‌گرفته [7] نفوذپذیری خاک تثبیت‌شده با ۵٪ آهک زنده پس از ۷ روز عمل‌آوری افزایش می‌یابد و پس از آن در اثر واکنش‌های پوزولانی در اثر کاهش منافذ بین ذرات کاهش نفوذپذیری در زمان

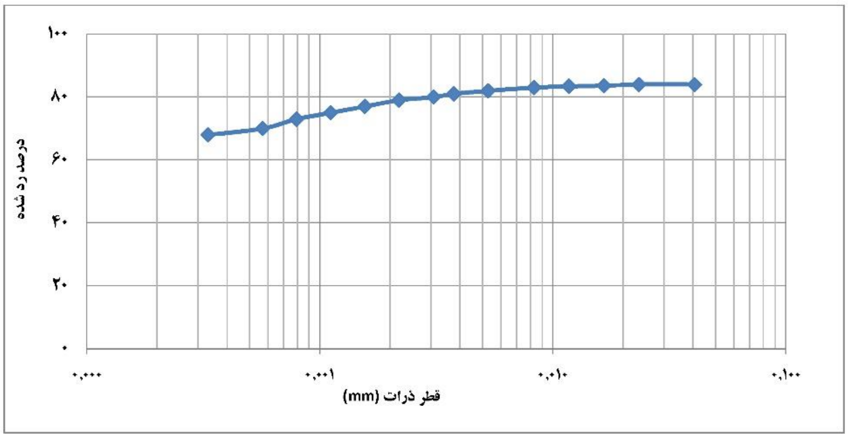
عمل‌آوری بالاتر پیش‌بینی می‌شود. افزایش یا کاهش نفوذپذیری خاک اصلاح‌شده برروی تورم و زمان تورم و یا فشار تورم تأثیر می‌گذارد. در نتیۀه این تحقیق همچنین ابراز شده است که تورم سریع‌تر نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک درمقایسه با نمونه‌های تثبیت‌نشده به‌خاطر عمدتا پروسه هیدراسیون آهک می‌باشد که پس از به آب انداختن نمونه‌ها شروع می‌شود. افزایش دما تا ۲۰°C در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک دلیل اثبات شروع این پروسه ذکر شده است [7]. دراثر هیدراسیون آهک زنده، پروسۀ تورم آهک نیز رخ می‌دهد. افزایش دمای خاک تثبیت‌شده با آهک زنده باعث افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانی و درنتیجه افزایش سرعت سخت شدن خاک در اثر این واکنش‌ها می‌شود [9]. علی‌رغم تحقیقات انجام‌شده برروی جنبه‌های مختلف اثر آهک روی رفتار خاک‌های تورم‌زا و باتوجه به تأثیر متفاوت انواع مختلف آهک برروی خاک‌های تورم‌زا به‌دلایل مختلف ازجمله آهک زنده و شکفته، ناخالصی و غیره درمورد موضوع تأثیر انواع آهک برروی مقدار فشار تورم و نرخ توسعۀ فشار تورم با زمان تاکنون بررسی گسترده صورت نپذیرفته است. در این تحقیق تأثیر آهک‌های زنده و شکفته از نوع سنتی و صنعتی برروی مقدار فشار تورم و نرخ توسعۀ فشار تورم با زمان یک خاک تورم‌زا بنتونیتی ارزیابی گردیده است.

مصالح مصرفی و خصوصیات آنها

بنتونیت. خاک‌هایی در تثبیت با آهک مؤثر هستند که میزان کانی‌های رسی موجود در آنها برای انجام واکنش‌های پوزولانی به‌اندازۀ کافی باشد. تمام کانی‌های رسی به‌علت دارا بودن سیلیس و آلومین به‌خوبی با آهک واکنش می‌دهند؛ ولی خاک‌های با پلاستیسیتۀ بالاتر در واکنش با آهک مؤثرترند و اثر اصلاح‌کنندگی آهک بیشتر می‌باشد.

بنتونیت مصرفی در مجموعه آزمایش‌های این تحقیق از شرکت درین کاشان تهیه شده است. رنگ این بنتونیت سفید روشن است. خصوصیات فنی این خاک که در آزمایشگاه براساس استاندارد ASTM به‌دست‌آمده است، در جدول (۱) آورده شده است.

منحنی دانه‌بندی بنتونیت مطابق شکل (۱) می‌باشد که از آزمایش هیدرومتری طبق استاندارد ASTM D 422-63 به‌دست‌آمده است.



شکل ۱ دانه‌بندی بنتونیت

جدول ۱ مشخصات فنی خاک مورد استفاده

ASTM Code	رطوبت طبیعی٪	w	۸
D422-63	ریزتر از ۲میکرون٪	CF	۷۹
D854	چگالی	G_s	۲/٦٥
D4318	حد انقباض٪	SL	۲٥
D4318	حد خمیری٪	PL	۳٦
D4318	حد روانی٪	LL	۱٥٥
D4318	نشانه خمیری٪	PI	۱۱۹
D4318	میزان فعالیت	A	۱/٥
D2487-06	طبقه‌بندی متحد	USCS	CH

جدول ۲ آنالیز شیمیایی آهک‌ها

ناخالصی٪	CaO%	$Ca(OH)_2$%	نوع آهک
۷	–	۹۳	آهک‌هیدراته صنعتی
٦	۹٤	–	آهک زنده صنعتی
۱۰	–	۹۰	آهک هیدراته سنتی
۱	۹۹	–	آهک زنده سنتی

آهک. درواقع هدف از تهیهٔ آهک، تبدیل سنگ آن به حالت قابل مصرف می‌باشد. آهک زنده یا شکفته‌نشده یا آب‌ندیده ماده‌ای سفیدرنگ و جذب‌کنندهٔ رطوبت است که از پخته‌شدن سنگ آهک به‌دست می‌آید و نشانهٔ شیمیایی آن CaO می‌باشد. هرگاه برروی کلسیم اکسید (آهک زنده) آب ریخته شود، بر اثر واکنش با آب، هیدراته می‌شود و گرما ایجاد می‌کند که موجب بخار شدن قسمتی از آب می‌شود. در این عمل، آهک براثر جذب آب، به‌صورت گرد سفیدی درمی‌آید که اصطلاحا آهک مرده یا شکفته‌شده یا هیدراته نامیده می‌شود. تولید آهک هیدراته پس از ایجاد آهک زنده و در شرایط ساده‌تر و کم‌هزینه‌تری انجام می‌شود. بنابراین قسمت اصلی فرایند تولید آهک زنده می‌باشد [10،۱۱]. به‌طور کلی آهک به دو صورت سنتی و صنعتی تهیه می‌شود.

در این تحقیق از آهک هیدراته و زندهٔ لرستان (صنعتی‌ساز) و آهک هیدراته و زندهٔ هفتکل (سنتی‌ساز) برای اختلاط با بنتونیت استفاده شد. نتیجهٔ آنالیز شیمیایی این آهک‌ها مطابق جدول (۲) می‌باشد.

آب. آب اگر حاوی مقادیر بالایی از نمک‌های محلول باشد بر روند پیشرفت واکنش‌ها تأثیر می‌گذارد. ترکیب شیمیایی آب مورد استفاده برای غرقاب نمودن نمونه روی مقدار تغییر حجم و فشار تورم مؤثر می‌باشد. خاک محلی که آب آن مقدار زیادی یون‌های کلسیم دارد، کمتر از خاک مناطقی که آب آن مقدار زیادی یون‌های سدیم دارد، متورم می‌شود. در این تحقیق از آب تصفیه‌شده استفاده شده است. علت این امر حذف اثرات شیمیایی آب در نمونه‌ها می‌باشد.

مراحل تهیهٔ نمونه و آزمایش‌های انجام‌گرفته

برای اختلاط بهتر بنتونیت با آهک، خاک بنتونیت از الک نمرهٔ ٤٠ عبور داده شد. خاک‌های مورد نیاز برای تراکم، ٢٤ ساعت قبل در گرم‌خانه با دمای ١١٠ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس نمونه‌ها مطابق جدول (٣)، وزن و با هم مخلوط شدند. در این تحقیق، تمام درصدهای آهک افزوده‌شده به بنتونیت، نسبت به وزن خشک بنتونیت می‌باشد نه نسبت به وزن کل مخلوط.

برای اختلاط بنتونیت با آهک هیدراته از اختلاط تر و برای اختلاط با آهک زنده از اختلاط خشک استفاده شد. در اختلاط تر ابتدا آهک هیدراته با نسبت وزنی ١ به ٣ با آب مخلوط می‌شود وسپس دوغاب ساخته‌شده برای مخلوط شدن با خاک به بنتونیت خشک اضافه می‌شود. بعد از آن مقدار آب اضافی مورد نیاز برای رسیدن مخلوط بنتونیت- آهک هیدراته به درصد رطوبت مورد نیاز اضافه می‌گردد.

در اختلاط خشک آهک زنده به‌صورت خشک به خاک بنتونیت خشک اضافه می‌شود و سپس مقدار آب مورد نیاز اضافه می‌گردد. این کار به‌منظور جلوگیری از شکفته‌شده آهک زنده قبل از اختلاط با خاک صورت می‌گیرد. در هر دو اختلاط سعی بر آن شد که رطوبت در کل مخلوط به‌صورت یکنواخت پخش شود.

آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

دستهٔ اول: آزمایش‌های مقدماتی برروی نمونه‌ها (حدود اتربرگ و تراکم به روش پراکتور استاندارد طبق استاندارد ASTM D 698).

دستهٔ دوم: آزمایش تورم با حجم ثابت برای ارزیابی فشار تورم نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D 4546.

دستهٔ سوم: آزمایش باربرداری به‌روش کنترل کرنش و کنترل تنش.

از نقطه‌نظر اختلاط با آهک نمونه‌های مورد بررسی به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند:

١- نمونه‌های بدون آهک درجا و بدون عمل‌آوری.
٢- نمونه‌هایی که با اختلاط تر با آهک مخلوط شده‌اند (شامل هر دو آهک هیدراتهٔ صنعتی و سنتی با عمل‌آوری ٠، ١، ٧، ٢٨ و ٩٠ روزه).
٣- نمونه‌هایی که با اختلاط خشک با آهک مخلوط شده‌اند (شامل هر دو آهک زندهٔ صنعتی و سنتی با عمل‌آوری ٠، ١، ٧، ٢٨ و ٩٠ روزه). اختلاط خشک به‌منظور جلوگیری از هیدراته‌شدن آهک زنده، قبل از مخلوط شدن با خاک می‌باشد.



شکل ٢ عمل‌آوری نمونه‌های متراکم‌شده

باتوجه به این‌که واکنش‌های شیمیایی پوزولانی بین آهک و خاک رس زمانبر است و همچنین به‌منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها روی مقادیر پارامترهای مربوط، تصمیم گرفته شد که تعدادی از نمونه‌ها قبل از آزمایش فشار تورم تحت عمل‌آوری در محیط مرطوب قرار گیرند. بدین منظور، نمونه‌های با عمل‌آوری بعد از مخلوط کردن و تراکم آنها و قبل از انجام آزمایش فشار تورم، درون ورق‌های پلاستیکی گذاشته شدند و برای عمل‌آوری درون ظروف پر از آب در دمای آزمایشگاه به‌مدت ۱، ۷، ۲۸ ،۹۰ روز قرار گرفتند (شکل۲). لازم به ذکر است که نمونه‌های درجا دو ساعت بعد از مخلوط کردن و تراکم آنها مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌های انجام‌شده مطابق جدول (۳) می‌باشد.

برطبق مطالعات پیشین محققان، ۳٪ آهک به‌عنوان درصد بهینه برای کاهش فشار تورم خاک رس به‌دست‌آمده است [4, 5, 9, 10]؛ بنابراین از ۳٪ آهک برای اختلاط با بنتونیت استفاده شد. برای هر ترکیب بنتونیت+۳٪ آهک، دو نمونه تهیه شد و فشار تورم آنها به‌دست آمد. درپایان آزمایش فشار تورم، برای هر دو نمونهٔ همهٔ ترکیبات، باربرداری به دو صورت کنترل کرنش و کنترل تنش صورت گرفت.

به‌منظور نمونه‌گیری حلقهٔ تحکیم برروی نمونهٔ متراکم‌شده قرار داده می‌شود. برای اعمال فشار یکنواخت به حلقه و نمونه از جک هیدرولیکی استفاده می‌شود. به‌علت افزایش حجم نمونه در طول آزمایش تصمیم بر آن شد تا ارتفاع نمونه حدود پنج میلی‌متر کمتر از ارتفاع حلقه درنظر گرفته شود تا نمونه فضای کافی برای افزایش ارتفاع داشته باشد. برای این منظور صفحه‌ای از جنس پلاستیک فشرده طوری تراش داده شد که روی آن، برجستگی استوانه‌ای‌شکل به‌قطر حلقهٔ تحکیم و ارتفاع پنج میلی‌متر ایجاد گردد. در این تحقیق از دو رینگ تحکیم با قطرهای ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر استفاده شده‌است.

آزمایش تورم با حجم ثابت

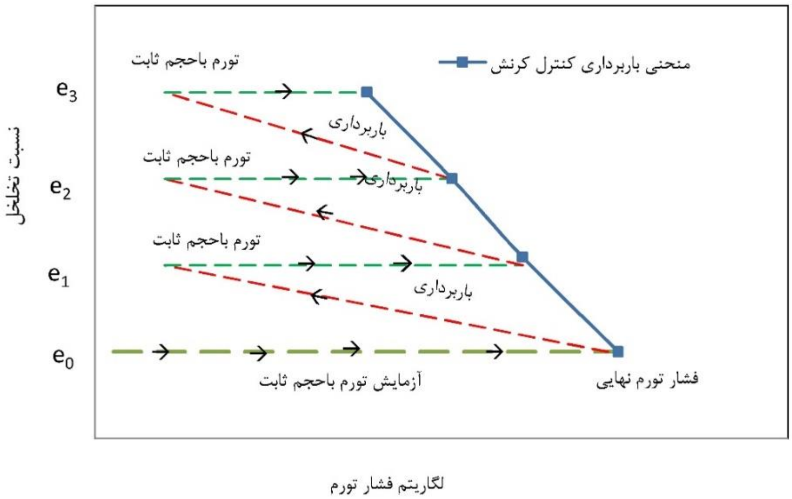
در روش تورم با حجم ثابت هدف یافتن بیشترین فشار لازم برای ثابت نگهداشتن ارتفاع اولیهٔ نمونه بعد از غرقاب نمودن آن است. در این روش نمونه درون دستگاه ادئومتر قرار داده می‌شود و سربارها به‌صورت گام‌های بارگذاری تا رسیدن به فشار تورم نهایی اعمال می‌شوند. در این روش ابتدا سربار کوچکی درحدود ۱۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود تا فشردگی (خروج هوا) صورت گیرد، بلافاصله پس از پایان فشردگی نمونه شروع به جذب آب می‌کند و متورم می‌شود. تورم نمونه تا رسیدن به حجم اولیه (ارتفاع اولیهٔ نمونه) ادامه پیدا می‌کند و به‌محض رسیدن به ارتفاع اولیه سربار بعدی (حدود ۱۰ کیلوپاسکال) به نمونه اعمال می‌شود و دوباره چرخهٔ فشردگی و تورم تحت سربار اعمالی صورت می‌گیرد؛ این روند آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا نمونه بتواند به تمام بارهای اعمالی غلبه کند. به سربار نهایی واردشده به نمونه، فشار تورم اطلاق می‌شود.

باربرداری به‌صورت کنترل کرنش و کنترل تنش

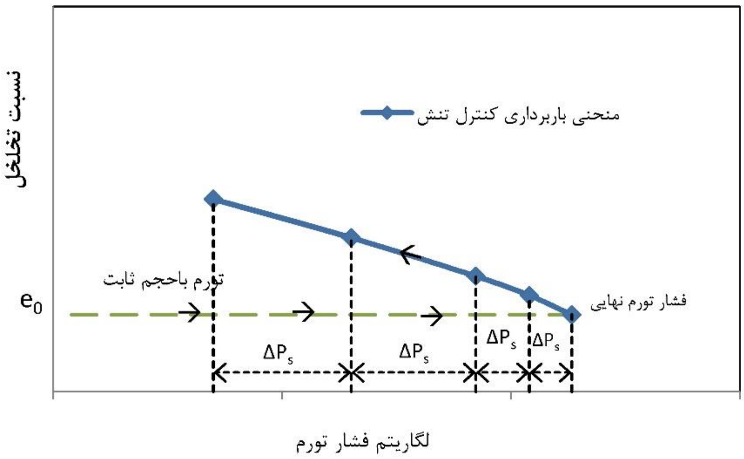
پس از اتمام آزمایش حجم ثابت، برای به‌دست آوردن شاخص (نشانه) باربرداری شروع به باربرداری از نمونه‌ها می‌شود. همان‌طور که قبلا گفته شد برای هر ترکیب بنتونیت +۳٪ آهک، دو نمونه تهیه شد و فشار تورم آنها به‌دست آمد. درپایان آزمایش فشار تورم، برای هر دو نمونهٔ همهٔ ترکیبات، باربرداری به دو صورت کنترل کرنش و کنترل تنش صورت گرفت. شیب خطوط باربرداری در منحنی تخلخل– لگاریتم فشار تورم به‌عنوان شاخص تورم کنترل‌کرنش و کنترل‌تنش موسوم است.

در روش باربرداری با کنترل‌کرنش، پس از برداشتن سربارها به نمونه اجازهٔ تورم تا مقدار مشخص (۰/۲۵ میلی‌متر) داده می‌شود. به‌محض رسیدن ارتفاع نمونه به این مقدار، از دوباره شروع به اندازه‌گیری فشار تورم با حجم ثابت می‌شود و فشار تعادل نهایی به‌دست می‌آید. سپس باربرداری مجدد از نمونه انجام می‌شود تا نمونه

به‌اندازهٔ همان مقدار مشخص قبلی (۰/۲۵ میلی‌متر) متورم شود و با رسیدن به آن مقدار فشار تورم آن مرحله نیز به‌دست می‌آید و این چرخه به همین صورت ادامه پیدا می‌کند. در هر مرحله از باربرداری با کنترل‌کرنش، فشار موجود برروی نمونه و نسبت تخلخل آن مرحله از نمونه معرف یک نقطه از منحنی تخلخل- فشار تورم می‌باشد. با رسم این نقاط منحنی باربرداری با کنترل کرنش به‌دست می‌آید (شکل ۳). روش باربرداری با کنترل‌تنش همان روش معمول و رایج باربرداری می‌باشد، با این توجه که مقدار سربار باربرداری شده (ΔP_s) در همهٔ مراحل از باربرداری، یکسان می‌باشد. در هر مرحله از باربرداری فشار موجود برروی نمونه و میزان تغییرات ارتفاع نمونه، معرف یک نقطه از منحنی نسبت تخلخل- فشار تورم می‌باشد (شکل ٤).



شکل ۳ مسیر انجام آزمایش باربرداری با کنترل کرنش



شکل ٤ مسیر انجام آزمایش باربرداری با کنترل تنش

جدول ۳ چارت آزمایش‌های انجام‌شده

نمونه	ترکیبات	زمان عمل‌آوری (روز)				
		درجا	۱	۷	۲۸	۹۰
۱ تا ۲	بنتونیت	✓	-	-	-	-
۳ تا ۱۲	بنتونیت+۳٪آهک هیدراته صنعتی	✓	✓	✓	✓	✓
۱۳ تا۲۲	بنتونیت +۳درصد آهک زنده صنعتی	✓	✓	✓	✓	✓
۲۳تا ۳۲	بنتونیت +۳٪آهک هیدراته سنتی	✓	✓	✓	✓	✓
۳۳تا ٤۲	بنتونیت +۳٪آهک زنده سنتی	✓	✓	✓	✓	✓

جدول ٤ حدود اتربرگ نمونه‌های آزمایش‌شده

نمونه	حد روانی(٪)	حد خمیری(٪)	نشانه خمیری(٪)
بنتونیت	۱۵۵	۳٦	۱۱۹
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته صنعتی	۱٤۵	٦٤	۸۱
بنتونیت+۳٪آهک زنده صنعتی	۱۸۵	٦۸	۱۱۷
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته سنتی	۱۲۵	٦۲	٦۳
بنتونیت+۳٪آهک زنده سنتی	۱۷۰	٦۵	۱۰۵

نتایج آزمایش‌ها

حدود اتربرگ. نتایج آزمایش‌های حد روانی، حد خمیری و همچنین نشانهٔ خمیری نمونه‌ها در جدول (٤) آورده شده است. براساس نتیجهٔ نشانهٔ خمیری بنتونیت و باتوجه به منحنی دانه‌بندی آن (شکل ۱)، این خاک برطبق سیستم متحد در گروه CH می‌باشد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش حدود اتربرگ، تمام نمونه‌ها دارای پتانسیل تورمی بالایی می‌باشند. حد روانی در هر دو نمونهٔ تثبیت‌شده با آهک زندهٔ صنعتی و سنتی نسبت به خاک پایه افزایش یافته است، که دلیل آن جذب درصدی از رطوبت به‌وسیلهٔ آهک زنده که تمایل زیادی به جذب رطوبت دارد، می‌تواند باشد. درحالی‌که حد روانی در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراته نسبت به خاک پایه کاهش را نشان می‌دهد، که دلیل آن را می‌توان در افزایش غلظت کاتیون‌های کلسیم آهک در اطراف ذرات رس و درنتیجه افزایش اندازهٔ دانه‌های خاک و زیادشدن فاصله بین این ذرات دانست که باعث کاهش حد روانی شده‌است [12]. حد خمیری همهٔ نمونه‌های تثبیت‌شده با انواع آهک نسبت به خاک پایه افزایش یافته است. در کوتاه‌مدت واکنش تبادل کاتیونی بین ذرات خاک و آهک صورت می‌گیرد که باعث تغییر ساختار خاک به حالت مجتمع یا فولوکوله می‌شود و این ساختار

در رطوبت بالایی به‌حالت خمیری درمی‌آید [13]. از سوی دیگر هر چه درصد ذرات رس بیشتر باشد، باعث می‌گردد خاک دیرتر و در درصد رطوبت پایین‌تری ترک بخورد؛ درنتیجه برای نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک به‌دلیل داشتن درصد ذرات رس پایین‌تر نسبت به بنتونیت خالص درصد رطوبت ترک خوردن (حد خمیری) افزایش می‌یابد. نشانهٔ خمیری همهٔ نمونه‌های تثبیت‌شده با انواع آهک نسبت به خاک پایه کاهش یافته است. جذب یون کلسیم توسط ذرات رسی و ایجاد توازن نسبی میان بارهای منفی و مثبت باعث کاهش تمایل ذرات رسی به جذب مولکول‌های آب می‌شود که نتیجهٔ آن کاهش نشانهٔ خمیری خاک می‌باشد [14].

نتایج آزمایش تراکم استاندارد

مطابق شکل(٥) منحنی‌های تراکم همهٔ نمونه‌های تثبیت‌شده با انواع آهک نسبت به خاک پایهٔ پایین‌تر (وزن مخصوص خشک کمتر) و همچنین متمایل به‌سمت راست (درصد رطوبت بیشتر) قرار گرفته‌اند. درنتیجه در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک وزن مخصوص خشک ماکزیمم نسبت به خاک پایه کاهش و درصد رطوبت بهینهٔ آنها افزایش یافته است. آهک و خاک رس به‌سرعت واکنش می‌دهند و باعث تغییر ساختار خاک می‌شوند و وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. همچنین آهک اساسا از خاک سبک‌تر است و وزن مخصوص خشک را کاهش می‌دهد [15]. اضافه کردن آهک به خاک باعث افزایش خلل و فرج خاک می‌شود که خود عاملی برای کاهش وزن مخصوص خشک است [16]. اضافه کردن آهک باعث افزایش درصد رطوبت بهینهٔ نمونه‌ها می‌شود. این افزایش به‌علت جذب درصدی از رطوبت برای ایجاد واکنش‌های تبادل کاتیونی و پوزولانی بین آهک و خاک رس می‌باشد [17]. از طرفی مطابق شکل منحنی‌های تراکم مربوط به نمونه‌های بنتونیت تثبیت‌شده با آهک زنده (صنعتی و سنتی) نسبت به نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک هیدراته (صنعتی و سنتی) در موقعیت پایین‌تر (کاهش وزن مخصوص خشک) و همچنین در سمت راست (افزایش درصد رطوبت) قرار گرفته‌اند. این افزایش در درصد رطوبت بهینه در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زنده نسبت به نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراته به‌دلیل آن است که درطی واکنش‌های یون کلسیم با خاک رس، CaO (اکسید کلسیم) هیدراته می‌شود و باعث مصرف مقدار مشخصی از آب می‌گردد [15].

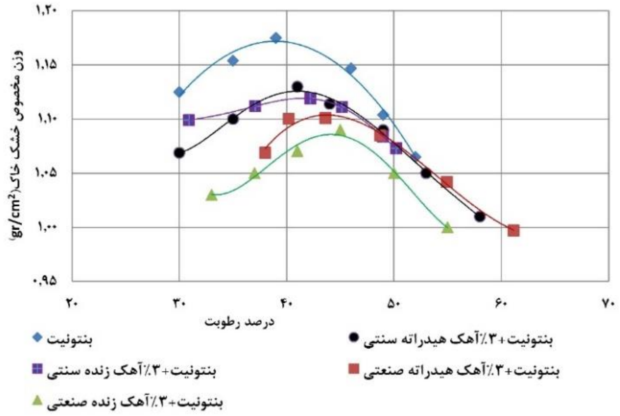
نتایج آزمایش تورم با حجم ثابت

باتوجه به دسته‌بندی آزمایش‌های صورت‌گرفته مطابق جدول (٣) برای هر ترکیب دو نمونه برای آزمایش تورم با حجم ثابت تهیه شد. سپس از نتایج این دو آزمایش میانگین‌گیری شد و نمودار فشار تورم- لگاریتم زمان ترکیب مورد نظر به‌دست آمد.

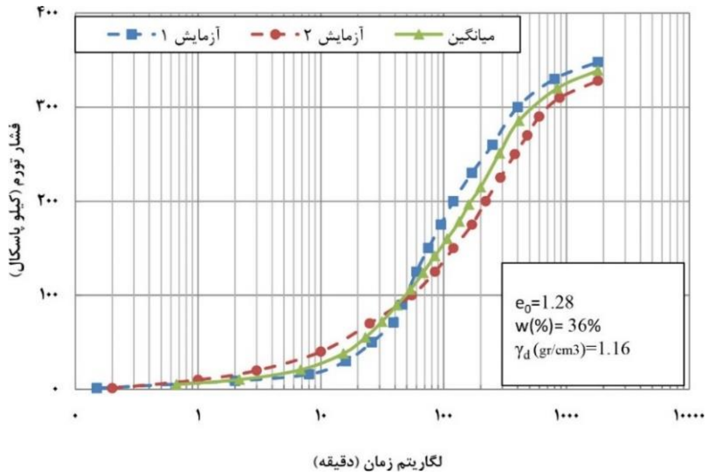
نمودار فشار تورم در برابر لگاریتم زمان بنتونیت خالص در شکل (٦) نمایش داده شده است.

تأثیر انواع آهک بر فشار و زمان تورم نمونه‌ها. تأثیر انواع آهک بر فشار و زمان تورم بنتونیت در زمان‌های عمل‌آوری ٠، ١، ٧، ٢٨ و ٩٠ نشان می‌دهد که افزودن آهک (هر ٤ نوع آهک) به بنتونیت باعث کاهش فشار تورم شده است. درواقع اضافه کردن آهک به خاک رس باعث افزایش یون کلسیم در محیط می‌شود که این یون جایگزین یون‌های سدیم و پتاسیم خاک رس می‌شود و این یون‌های جایگزین‌شده وابستگی کمتری به آب دارند و باعث بهبودی خواص خمیری و کاهش فشار تورم خاک رس می‌شوند.

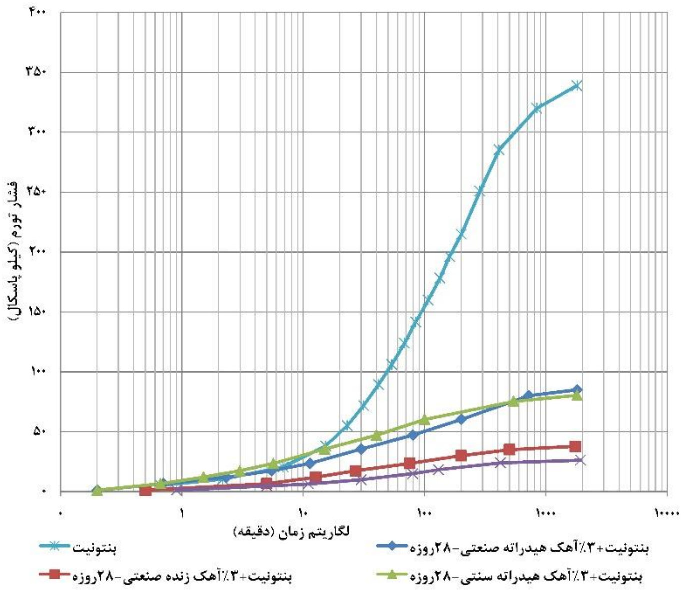
علت کاهش فشار و زمان تورم نمونه‌های با عمل‌آوری درجا (عمل‌آوری ٢ ساعت) را می‌توان در تبادل کاتیونی که جزء واکنش‌های کوتاه‌مدت خاک رس و آهک است، دانست.



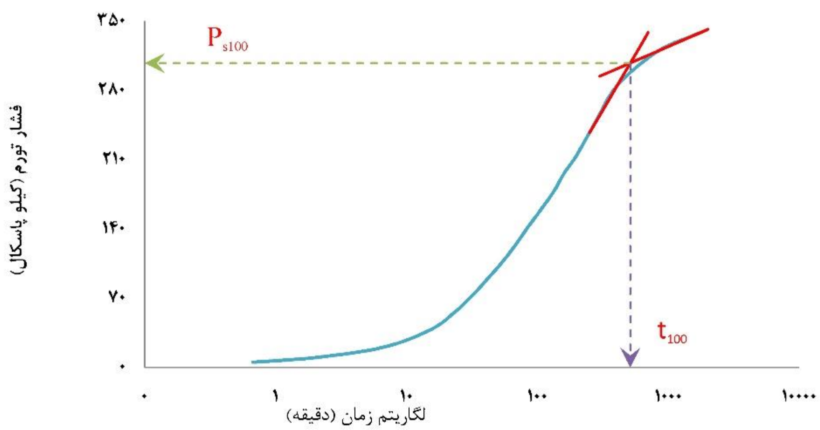
شکل ۵ منحنی تراکم بنتونیت و بنتونیت ثبیت‌شده با آهک‌های هیدراته و زندهٔ صنعتی



شکل ٦ نمودار فشار تورم– لگاریتم زمان بنتونیت خالص



شکل ۷ مقایسهٔ زمان و فشار تورم بنتونیت خالص با بنتونیت تثبیت‌شده با انواع آهک با عمل‌آوری ۲۸روزه



شکل ۸ تعیین P_{s100} و t_{100} برای بنتونیت خالص

جدول ۵ نتایج آزمایش تراکم نمونه‌ها

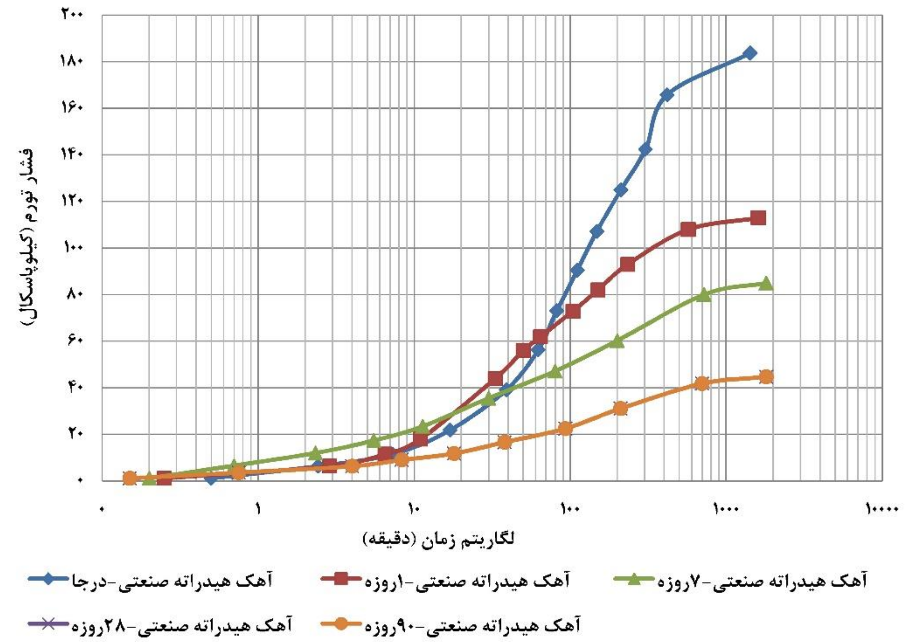
نمونه	ω_{opt} (%)	$\gamma_{d(max)}$ (gr/cm^3)
بنتونیت	۳۹	۱/۱۷
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته صنعتی	٤٤	۱/۱۱
بنتونیت+۳٪آهک زنده صنعتی	٤٥	۱/۰۹
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته سنتی	٤۱	۱/۱۳
بنتونیت+۳٪آهک زنده سنتی	٤۲	۱/۱۲

واکنش تبادلی معمولا باعث تغییرات مهمی در مشخصات فیزیکی و شیمیایی رس می‌شود. در این واکنش تبادلی یون‌های بین لایه‌ای رس مانند سدیم با یون کلسیم آهک جایگزین می‌شوند و باعث کاهش تمایل ذرات خاک به جذب آب و درنهایت ایجاد یک ساختار مجتمع و لخته‌ای می‌شود [7]. این واکنش سریع است و در ساعات اولیهٔ اختلاط مواد انجام می‌شود. با افزایش زمان عمل‌آوری واکنش‌های پوزولانی باعث ایجاد مواد جدید سمنتاسیون شامل سیلیکات و آلومینات کلسیم هیدراته می‌شود که با مرور زمان مقدار آنها افزایش می‌یابد و باعث به‌هم چسبیده‌شدن بیشتر ذرات رس به یکدیگر می‌شود [4, 7]. تأثیر انواع آهک با عمل‌آوری ۲۸روزه بر زمان و فشار تورم نمونه‌ها در شکل (۷) به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

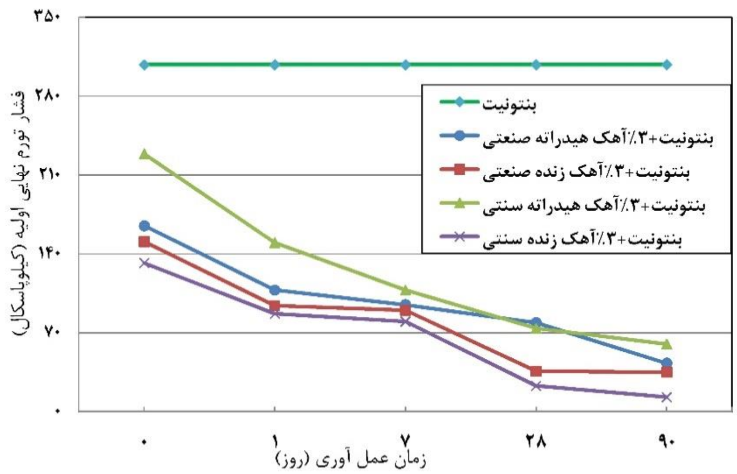
بررسی مقدار فشار تورم اولیه(Ps_{100}) و زمان فشار تورم اولیه (t_{100}). نحوهٔ تعیین مقدار فشار تورم اولیه(Ps_{100}): آخرین نقطهٔ فشار تورم که از تقاطع خط مماس بر خمیدگی و خط فشار تورم ثانویه در نمودار فشار تورم- لگاریتم زمان حاصل می‌شود (شکل ۸). زمان فشار تورم اولیه (t_{100}) که زمان متناظر با مقدار فشار تورم اولیه می‌باشد به‌دست می‌آید.

بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقدار و زمان فشار تورم. اثر زمان عمل‌آوری بر زمان و فشار تورم نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک بررسی شده است. در شکل (۹) منحنی‌های توسعهٔ فشار تورم با زمان برای نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراتهٔ صنعتی به‌عنوان نمونه و در

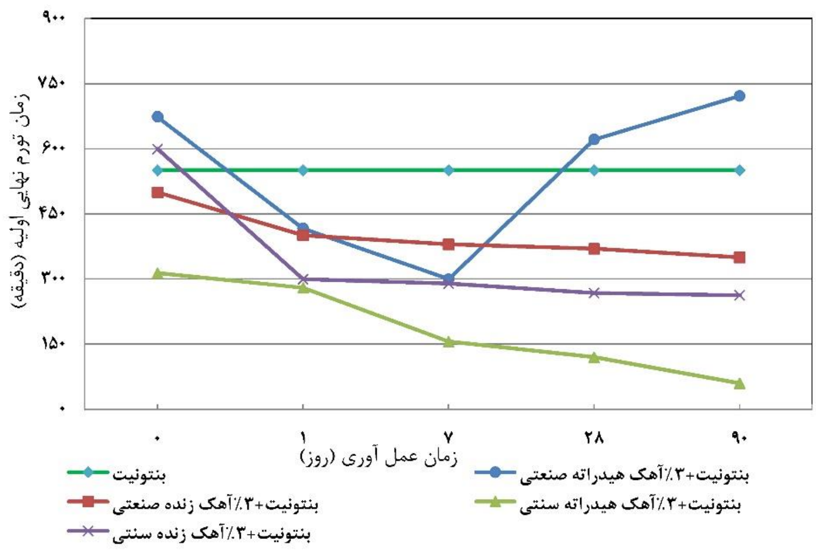
شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مقدار فشار تورم اولیه (P_{s100}) و مقدار زمان رسیدن به فشار تورم اولیه (t_{100}) برای کلیهٔ نمونه‌های آزمایش‌شده ارائه شده است. مشاهده می‌شود برای نمونه‌های تثبیت‌شده با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار فشار تورم و زمان رسیدن به فشار تورم اولیهٔ نمونه‌ها کاهش یافته است. با بررسی منحنی‌های توسعٔ زمانی فشار تورم در شکل (۹) مشخص می گردد که نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک درمقایسه با نمونهٔ بنتونیت خالص نرخ سریع‌تری را نشان می‌دهند و این موضوع در زمان‌های عمل‌آوری مشهودتر می‌باشد. این می‌تواند به‌دلیل افزایش در نفوذپذیری نمونه‌ها دراثر عمل تجمع ذرات خاک ناشی از حضور یون کلسیم باشد. سفت شدن خاک با زمان عمل‌آوری نیز می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش نرخ توسعهٔ فشار تورم با زمان با افزایش زمان عمل‌آوری باشد. یکی از دلایل کاهش در مقدار فشار تورم با زمان عمل‌آوری را می‌توان این‌گونه دانست که عمل‌آوری طولانی، زمان بیشتری برای تشکیل واکنش‌ها در اختیار می‌گذارد؛ درنتیجه استخوان‌بندی قوی‌تری از دانه‌ها به‌دلیل اضافه شدن مواد جدید ناشی از واکنش‌های پوزولانی ایجاد می‌شود [4, 7]. در این حالت ساختار خاک ریزدانه به ساختار مجتمع تبدیل می‌شود. در این ساختار ذرات رس به همدیگر پیوند داده می‌شوند. طی مجتمع شدن در این ساختار، ذرات رس به همدیگر توسط مواد سمنتاسیون می‌چسبد؛ درنتیجه، اندازهٔ ذرات رس بزرگ‌تر می‌شوند و از لحاظ مکانیکی، رفتاری شبیه لای پیدا می‌کنند [14]. به‌علاوه این واکنش باعث تغییر ساختار رس از ماده‌ای چسبنده و ریزدانه، به ماده‌ای دانه‌ای می‌شود. خاک نیز در این ساختار وابستگی کمتری به آب دارد و باعث کاهش تورم خاک می‌شود [7]. دلیل دیگر کاهش فشار تورم با افزایش زمان عمل‌آوری، ادامهٔ واکنش‌های پوزولانی (تشکیل هیدرات سیلیکات و آلومینات کلسیم) با گذشت زمان می‌باشد.



شکل ۹ مقایسهٔ اثر زمان عمل‌آوری بر زمان و فشار تورم بنتونیت + ۳٪ آهک هیدراتهٔ صنعتی



شکل ۱۰ مقایسهٔ P_{s100} نمونه‌های بنتونیت تثبیت‌شده با انواع آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۱۱ مقایسهٔ t_{100} نمونه‌های بنتونیت تثبیت‌شده با انواع آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

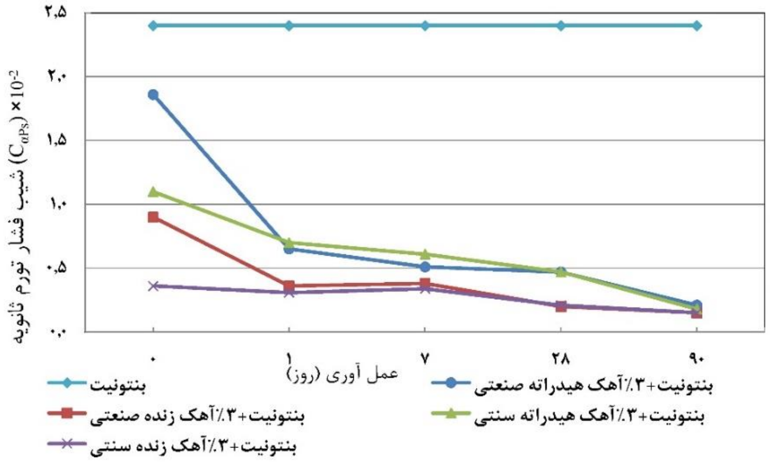
مواد تشکیل‌شده موجب پیوند سمنتاسیون بین ذرات رس می‌شوند. از سوی دیگر کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری [7]، باعث کاهش جذب آب نمونه‌ها می‌شود؛ که نتیجهٔ آن کاهش در مقدار فشار تورم می‌باشد. تأثیر زمان عمل‌آوری بر زمان و فشار تورم نمونه‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. در شکل (۹) مقدار فشار تورم اولیه (P_{s100}) با افزودن آهک به بنتونیت و با افزایش مدت عمل‌آوری به‌شدت کاهش یافته است.

از طرفی از بین نمونه‌های بنتونیت تثبیت‌شده با آهک، نمونه‌های دارای آهک زندهٔ سنتی و آهک هیدراتهٔ سنتی به‌ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار P_{s100} در هر پنج زمان عمل‌آوری می‌باشند. به‌علاوه، روند کاهشی P_{s100} برای هر چهار نمونه روند منظمی است (شکل ۱۰). تفاوت در مقدار فشار تورم می‌تواند ناشی از وجود ناخالصی‌ها نسبت تخلخل متفاوت و واکنش‌های پوزولانی متفاوت در نمونه‌ها باشد. تغییرات مقادیر زمان

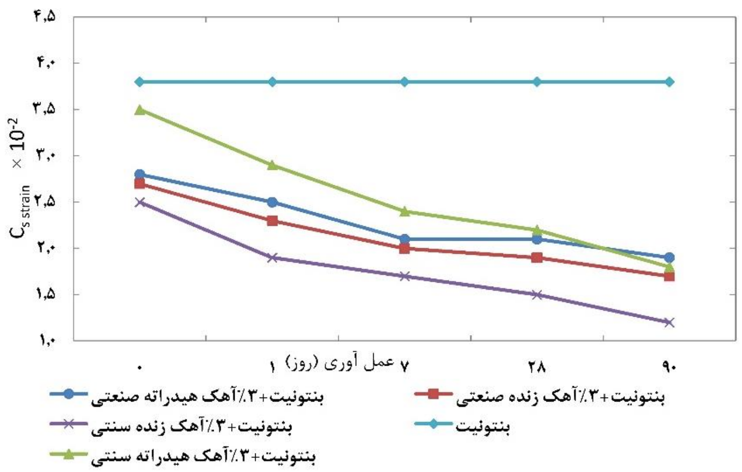
رسیدن به فشار تورم اولیه (t_{100}) با مدت زمان عمل‌آوری در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. مقدار t_{100} در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک‌های هیدراته و زندهٔ سنتی و آهک زندهٔ صنعتی با گذشت زمان عمل‌آوری، کاهش یافته است. در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراتهٔ صنعتی در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰روزه به‌جای کاهش مقدار t_{100}، افزایش در این مقدار مشاهده می‌شود. این افزایش احتمالا به‌دلیل تأخیر در انجام واکنش‌های پوزولانی درازمدت برای آهک هیدراتهٔ صنعتی و بنتونیت است. همچنین از بین نمونه‌های بنتونیت تثبیت‌شده با آهک، نمونه‌های دارای آهک هیدراتهٔ سنتی دارای کمترین مقدار t_{100} می‌باشند. برخلاف روند تغییرات P_{s100} نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری آنها، این روند برای t_{100} نمونه‌ها روند منظمی نمی‌باشد.

شیب تغییرات فشار تورم ثانویه با زمان ($C_{\alpha P_s}$). در شکل (۱۲) شیب تغییرات فشار تورم ثانویه با زمان($C_{\alpha P_s}$) با زمان عمل‌آوری نمایش داده شده است. افزودن آهک باعث کاهش شدیدی در مقدار شیب فشار تورم ثانویه با زمان می‌شود. آهک زندهٔ سنتی دارای کمترین مقدار $C_{\alpha P_s}$ در زمان‌های عمل‌آوری مختلف می‌باشد. از طرفی با گذشت زمان و در زمان عمل‌آوری ۹۰روزه آهک‌ها، مقدار شیب فشار تورم ثانویه برای همهٔ آهک‌ها تقریبا یکسان مشاهده شد. شیب فشار تورم ثانویه با زمان نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زندهٔ صنعتی کمتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدارتهٔ صنعتی می‌باشد. همان‌گونه که قبلا نیز گفته شد، آهک زنده نسبت به آهک هیدراته در کاهش فشار تورم بهتر عمل می‌کند. البته با گذشت زمان و در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزهٔ آهک، مقدار $C_{\alpha P_s}$ برای هر دو یکسان می‌شود. همچنین با گذشت زمان عمل‌آوری این مقدار برای هر دو آهک کاهش می‌یابد.

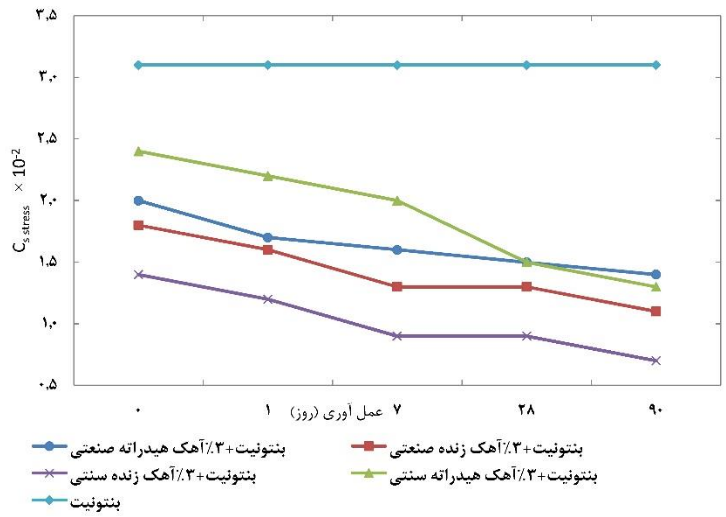
تعیین شاخص تورم کنترل تنش و کنترل کرنش نمونه‌ها. همان‌گونه که قبلا نیز گفته شد، در پایان آزمایش تورم با حجم ثابت باربرداری برای هر کدام از ترکیبات به دو روش کنترل کرنش و کنترل تنش صورت گرفت در این نمودارها خط افقی نشان‌دهندهٔ آزمایش تورم با حجم ثابت و دو خط مورب نشان‌دهندهٔ منحنی باربرداری هستند. شیب خطوط باربرداری معرف شاخص تورم می‌باشد. نمودار باربرداری با کنترل کرنش و کنترل تنش بنتونیت خالص در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ مقایسهٔ $C_{\alpha Ps}$ نمونه‌های بنتونیت تثبیت‌شده با انواع آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۱٤ مقایسهٔ تغییرات شاخص تورم کنترل کرنش نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری



شکل ۱۵ مقایسهٔ تغییرات شاخص تورم کنترل تنش نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری

در شکل‌های (١٤ و ١٥) به‌ترتیب تغییرات شاخص تورم باربرداری با کنترل کرنش ($C_{s_{strain}}$) و شاخص تورم باربرداری با کنترل تنش ($C_{s_{stress}}$) با مدت زمان عمل‌آوری نمایش داده شده است. با مقایسهٔ این دو شکل مشاهده می‌شود که شاخص تورم باربرداری با کنترل کرنش از شاخص تورم باربرداری با کنترل تنش بزرگ‌تر می‌باشد. این مسئله شاید به این دلیل است که در روش باربرداری با کنترل تنش نمونه تحت سرباری شروع به تورم می‌کند (این سربار کمتر از سربار نهایی است)؛ درصورتی‌که در روش باربرداری با کنترل کرنش با برداشتن کامل سربارها اجازهٔ تورم به نمونه‌ها داده می‌شود و سپس بارگذاری در شرایط حجم ثابت اعمال می‌شود که خود این بارگذاری از بارهای کوچک شروع می‌شود تا به سربار نهایی برسد. درنتیجه در این مرحله (سربارهای کوچک‌تر از حالت کنترل تنش) به نمونه اجازهٔ جذب رطوبت بیشتری داده می‌شود. میزان شاخص تورم با زمان عمل‌آوری کاهش می‌یابد.

خلاصه نتایج نمونه‌های آزمایش‌شده

در جدول (٦) نتایج کلیهٔ آزمایش‌های انجام‌گرفته به‌صورت خلاصه‌شده جمع‌آوری شده است. طبق این جدول مقدار فشار تورم بنتونیت خالص بعد از مخلوط

شدن با ۳ درصد آهک‌های مختلف به‌اندازهٔ ٥٦-٢٦ درصد بدون عمل‌آوری و ۹٦-۸۱ درصد بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری کاهش پیدا کرده است. درصد متفاوت کاهش فشار تورم برای آهک‌های مختلف ممکن است به‌علت وجود ناخالصی در آنها و نسبت تخلخل‌های متفاوت و واکنش‌های پوزولانی متفاوت در نمونه‌ها باشد. چنان‌چه طبق جدول (۳) میزان ناخالصی در آهک زندهٔ سنتی ۱ درصد است و در صدهای بالای کاهش در مقدار فشار تورم متعلق به نمونه‌های تثبیت‌شده با این نوع آهک می‌باشد.

جدول ٦ خلاصه نتایج نمونه های آزمایش شده

نمونه‌ها	P_{100}(kPa)	t_{100}(min)	$C_{\alpha_{P_s}}$	$C_{s_{strain}}$	$C_{s_{stress}}$	γ_d (gr/cm^3)	$\omega_{(\%)}$	e_0
بنتونیت	۳۰۸	٥٥۱	۰/۰۲٤	۰/۰۲٤	۰/۰۳۱	۱/۱٦٥	۳٦/۰	۱/۲۸
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته صنعتی-درجا	۱٦٥	٦۷٤	۰/۰۱۸٦	۰/۰۲۸	۰/۰۲	۱/۰۹۸	٤۱/۲	۱/۲۲
بنتونیت+۳٪آهک زنده صنعتی-درجا	۱٥۱	٥۰۰	۰/۰۰۹	۰/۰۲۷	۰/۰۱۸	۱/۰۸	٤۲/٥	۱/۱۳
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته سنتی-درجا	۲۲۹	۳۱٤	۰/۰۱۱	۰/۰۳٥	۰/۰۲٤	۱/۱۲	۳۸/۰	۱/۱٥
بنتونیت+۳٪آهک زنده سنتی-درجا	۱۳۲	٦۰۰	۰/۰۰۳٦	۰/۰۲٥	۰/۰۱٤	۱/۱۱۸	۳۹/٤	۱/۱۹
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته صنعتی-۱روزه	۱۰۸	٤۱۷	۰/۰۰٦٥	۰/۰۲٥	۰/۰۱۷	۱/۱	٤۱/٥	۱/۱۱
بنتونیت+۳٪آهک زنده صنعتی-۱روزه	۹٤	٤۰۱	۰/۰۰۳٦	۰/۰۲۳	۰/۰۱٦	۱/۰۸	٤۲/۰	۱/۰۹
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته سنتی-۱روزه	۱٥۰	۲۸۰	۰/۰۰۷	۰/۰۲۹	۰/۰۲۲	۱/۱۲	۳۸/۰	۱/۱۱
بنتونیت+۳٪آهک زنده سنتی-۱روزه	۸۷	۳۰۰	۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲	۱/۱۲	۳۹/٥	۱/۰۰
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته صنعتی-۷روزه	۹٥	۳۰۰	۰/۰۰٥۱	۰/۰۲۱	۰/۰۱٦	۱/۰۹٥	٤۰/۸	۱/۳۰
بنتونیت+۳٪آهک زنده صنعتی-۷روزه	۹۰	۳۸۰	۰/۰۰۳۸	۰/۰۲۰	۰/۰۱۳	۱/۰۹	٤۲/۳	۱/۱۷
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته سنتی-۷روزه	۱۰۸	۱٥٦	۰/۰۰٦۱	۰/۰۲٤	۰/۰۲۰	۱/۱۲۰	۳۸/۰	۱/۱۰
بنتونیت+۳٪آهک زنده سنتی-۷روزه	۸۰	۲۹۰	۰/۰۰۳٤	۰/۰۱۷	۰/۰۰۹	۱/۱۱٦	۳۸/۸	۱/۳۰
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته صنعتی-۲۸روزه	۷۹	٦۲۲	۰/۰۰٤۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱٥	۱/۰۸	٤۰/٥	۱/۱۸
بنتونیت+۳٪آهک زنده صنعتی-۲۸روزه	۳٦	۳۷۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳	۱/۰۷	٤۱/٥	۱/۲۹
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته سنتی-۲۸روزه	۷٤	۱۲۰	۰/۰۰٤۷	۰/۰۲۲	۰/۰۱٥	۱/۱۲	۳۸/۰	۱/۱۹
بنتونیت+۳٪آهک زنده سنتی-۲۸روزه	۲۳	۲٦۸	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱٥	۰/۰۰۹	۱/۱۱٦	۳۸/٥	۱/۰۹
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته صنعتی-۹۰روزه	٤۳	۷۲۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱٤	۱/۰۸۰	٤۰/٥	۱/۲۰
بنتونیت+۳٪آهک زنده صنعتی-۹۰روزه	۳٥	۳٥۰	۰/۰۰۱٥	۰/۰۱۷	۰/۰۱۱	۱/۸۰	٤۲/۰	۱/۲۲
بنتونیت+۳٪آهک هیدراته سنتی-۹۰روزه	٦۰	٦۰	۰/۰۰۱۸	./۰۱۸	۰/۰۱۳	۱/۱۲۰	۳۸/۰	۱/۲۳
بنتونیت+۳٪آهک زنده سنتی-۹۰روزه	۱۳	۲٦۳	۰/۰۰۱٥	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷	۱/۱۱٦	۳۸/۸	۱/۳۰

کاهش در فشار تورم در نمونه‌های بدون عمل‌آوری می‌تواند به‌علت بروز پدیدهٔ تجمع ذرات در اثر حضور یون کلسیم و در نمونه‌های با عمل‌آوری در اثر واکنش‌های پوزولانی و تشکیل مواد سمنتاسیون هیدرات‌های سیلیکات و آلومینات کلسیم باشد. این دو پدیده، یعنی تجمع ذرات و واکنش‌های پوزولانی، هر دو باعث به‌هم چسبیده شدن ذرات خاک و جلوگیری از تورم آنها و درنتیجه کاهش در فشار تورم می‌شوند.

نتیجه‌گیری

۱- افزودن آهک‌های هیدراتهٔ صنعتی، زندهٔ صنعتی، هیدراتهٔ سنتی و زندهٔ سنتی به بنتونیت باعث افزایش حد انقباض می‌شود. همچنین افزودن آهک زنده به بنتونیت باعث افزایش حد روانی و افزودن آهک هیدراته باعث کاهش حد روانی می‌شود. درمجموع افزودن هر چهار نوع آهک به بنتونیت باعث کاهش نشانهٔ خمیری می‌شود.

۲- افزودن آهک‌های هیدراتهٔ صنعتی، زندهٔ صنعتی، هیدراتهٔ سنتی و زندهٔ سنتی به بنتونیت باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک می‌شود. افزایش در درصد رطوبت بهینه برای نمونه‌های دارای آهک زندهٔ صنعتی و سنتی بیشتر از آهک هیدراتهٔ صنعتی و سنتی می‌باشد. افزایش درصد رطوبت بهینه برای نمونه‌های دارای آهک‌های صنعتی هیدراته و زنده به‌ترتیب ۵ و ٦ درصد و برای آهک‌های سنتی هیدراته و زنده به‌ترتیب ۲ و ۳ درصد نسبت به بنتونیت خالص می‌باشد.

۳- هر دو آهک زنده (صنعتی و سنتی) رفتار بهتری در کاهش فشار تورم نمونه‌ها داشته‌اند. بیشترین کاهش در مقدار فشار تورم مربوط به نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زندهٔ سنتی با عمل‌آوری ۹۰روزه می‌باشد. البته ازنظر اقتصادی عمل‌آوری ۲۸روزه مناسب‌تر می‌باشد؛ زیرا میزان تغییرات در کاهش فشار تورم از عمل‌آوری ۷روزه به ۲۸روزه (٪۲۰) بیشتر از میزان تغییرات در عمل‌آوری ۲۸روزه به ۹۰روزه (٪۳) می‌باشد.

٤- افزایش زمان عمل‌آوری هر چهار آهک باعث افزایش در کاهش فشار تورم نمونه‌ها می‌شود.

۵- رفتار آهک هیدراتهٔ صنعتی (دارای ٪۹۳/۳ هیدروکسید کلسیم) در کاهش فشار تورم نمونه‌ها نسبت به آهک هیدراتهٔ سنتی (دارای ۹۰/۱% هیدروکسید کلسیم) بهتر می‌باشد.

٦- رفتار آهک زندهٔ سنتی (دارای ۹۸/۸% اکسید کلسیم) در کاهش فشار تورم نمونه‌ها نسبت به آهک زندهٔ صنعتی (دارای ۹٤% اکسید کلسیم) بهتر می‌باشد.

۷- شیب (سرعت) فشار تورم ثانویه به‌دست‌آمده برای بنتونیت خالص در این تحقیق ۰/۰۲٤ می‌باشد. افزودن آهک‌های هیدراتهٔ صنعتی، زندهٔ صنعتی، هیدراتهٔ سنتی و زندهٔ سنتی به بنتونیت باعث کاهش سرعت فشار تورم ثانویه بنتونیت می‌شود.

۸- رفتار آهک‌های زندهٔ صنعتی و سنتی در کاهش مقدار $C_{\alpha_{P_s}}$ نمونه‌ها تقریبا یکسان است. همچنین رفتار آهک‌های هیدراتهٔ صنعتی و سنتی در کاهش مقدار $C_{\alpha_{P_s}}$ نمونه‌ها نیز تقریبا یکسان است.

۹- هر دو آهک زنده (صنعتی و سنتی) رفتار بهتری در کاهش فشار تورم نمونه‌ها نسبت به آهک‌های هیدراته (صنعتی و سنتی) داشته‌اند.

۱۰- افزایش زمان عمل‌آوری هر چهار آهک باعث افزایش در کاهش مقدار $C_{\alpha_{P_s}}$ نمونه‌ها می‌شود. به‌طوری‌که بیشترین کاهش در زمان عمل‌آوری ۹۰روزه مشاهده می‌شود.

۱۱- شاخص باربرداری کنترل کرنش و کنترل تنش به‌دست‌آمده برای بنتونیت تثبیت‌نشده به‌ترتیب برابر ۰/۰۳۸ و ۰/۰۳۱ می‌باشد. افزودن آهک‌های هیدراتهٔ صنعتی، زندهٔ صنعتی، هیدراتهٔ سنتی و زندهٔ سنتی به بنتونیت باعث کاهش در مقدار $C_{s_{strain}}$ و $C_{s_{stress}}$ می‌شود.

۱۲- شاخص باربرداری کنترل کرنش همهٔ نمونه‌های

تثبیت‌شده با آهک بیشتر از شاخص باربرداری کنترل تنش می‌باشد، ($C_{s_{strain}} > C_{s_{stress}}$).

۱۳- هر دو آهک زنده (صنعتی و سنتی) رفتار بهتری در کاهش هر دو مقدار $C_{s_{strain}}$ و $C_{s_{stress}}$ نسبت به آهک‌های هیدراته (صنعتی و سنتی) داشته‌اند.

۱٤- افزایش زمان عمل‌آوری برای هر چهار آهک باعث افزایش در کاهش مقدار $C_{s_{strain}}$ و $C_{s_{stress}}$ نمونه‌ها می‌شود. به‌طوری‌که بیشترین کاهش در زمان عمل‌آوری ۹۰روزه مشاهده می‌شود.

۱۵- رفتار آهک هیدراتهٔ صنعتی در کاهش مقدار $C_{s_{strain}}$ و $C_{s_{stress}}$ نمونه‌ها بهتر از آهک هیدراتهٔ سنتی و همچنین رفتار آهک زندهٔ سنتی بهتر از آهک زندهٔ صنعتی می‌باشد. به طوری‌که بیشترین کاهش در مقدار $C_{s_{strain}}$ و $C_{s_{stress}}$ در هر زمان عمل‌آوری مربوط به نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زندهٔ سنتی می‌باشد.

١٦- باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده افزودن آهک زنده با درصد بالای اکسیدکلسیم و با عمل‌آوری ۲۸روزه اقتصادی‌ترین و بهترین عملکرد در کاهش فشار تورم و نشانه تورم را دارد.

مراجع

1. Mckeen, R.G., "Field Studies of Airport Pavement on Expansive Clay", proceeding of 4th *international conference on Expansive Soils*, Denver, Colorado, Vol. 1, Pp. 242-261, (1980).

2. عسکری، فرج الله.، فاخر، علی، «تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندس ژئوتکنیک»، واحد انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، ۱۳۷۲.

3. Jones, D. E. and Holts, W. G. "Expansive Soil- the Hidden Disaster", *Civil Engineering*, ASCE, 43, Pp. 49-51, (1973).

4. Pakbaz , M. S. and Farzi, M. "With Comparison of The Effect of Mixing Methods (Dry vs. Wet) On Mechanical and Hydraulic Properties of Treated Soil Cement or Lime", *Journal of Applied Clay Science*, 105-106 (2015), Pp. 156-169.

5. Mitchelle , J. K. "Soil Improvement- state – of – the art Report", Proc., *10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engr*., Stockholm, Sweden (1981), Pp. 509-565.

6. Consoli, N. C., Lopes, L.D.S., Prietto, P.D.M., Festugato, L. and Cruz, R.C. "Variabales Controlling Stiffness and Strength of Lime-stabilized Soils", *Journal of Geotech and Geoenvir. Engr*., Vol. 137 (2011), No. 6, Pp. 628-632.

7. Tran, T. D., Cui, Y. J. , Tang, A. M. , Audiguier, M. and Cojean, R. "Effect of Lime Treatment on the Microstructure and Hydraulic Conductivity of Hericourt Clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 6 (2014), Issue 5, Oct. 2014; Pp. 399-404.

8. Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, T.F. "Behavior and Mineralogy Changes in Lime– treated Expansive Soil at 20° C. *Journal of Applied Clay Science*, vol. 50 (2010), Issue 2, Pp. 191-198.

9. Wang, W. , Kong, L. and Zhao, C. "Dynamic Characteristics of Lime– treated Expansive Soil under Cyclic Loading", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 4, Issue 4, Dec. 2012, Pp. 352-359.

10. Sherwood, P., "Soil Stabilization with Cement and Lime", Transport Research Laboratory, HMSO Publication Centre, 153p, (1993).

۱۱. هاشمی طباطبایی، سعید، آقایی آرایی، عطاء، «مقایسهٔ تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده»، نشریهٔ علوم زمین، ش.٦٧، صص. ١٤-٢١، (١٣٨٧).

12. Wild, S., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B. and Humphreys, I., "Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Strength and Swelling Properties of Lime-Stabilized Kaolinite in the Presence of Sulphates", ClayMinerals, Vol. 31, No. 3, pp. 423-433, (1996).

13. Huat, B. B. K., "Organic and Peat Soil Engineering", Serdang, Malaysia, University Putra Malaysia Press, (2004).

14. Leroueil, S. and Bihan, J. P., "Liquid Limits and Fall Cones", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 5, pp. 793-798, (1996).

15. Ali Jawaid, S. M., "Stabilization of Organic Soil Using Un-Alaked Lime", proceedings of 4th international conference on civil engineering, *sharif university of technology*, Tehran, Iran, Vol. 2, pp. 326-333, (1997).

16. Rajasekaran, G., "Sulphate Attack and Ettringite Formation in the Lime and Cement Stabilized Marine Clays", *ocean engineering*, Vol. 32, No. 55, pp. 1133-1159, (2005).

17. Kumar, A., Walia, B. S. and Bajaj, A., "Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil", *journal of materials in civil engineering*, ASCE, Vol. 19, No. 3, pp. 242-248, (2007).